

「電磁気とエネルギー」の指導

ー「電流と磁界の相互作用」場面でのエネルギー概念の育成についてー

小 山 久 栄¹ 五十嵐 憲 夫²
郡 司 哲 也³ 斎 藤 好 子⁴

この研究は、電流と磁界の相互作用について探究する場面でのエネルギー概念の育成を
目ざした指導の実践研究である。この研究で、筆者らは3つの研究仮説に基づいてエネ
ルギー概念の育成に当たっている。その結果、生徒が問題意識をもって探究していくには、本
質に導ける明確な現象提示が必要であり、そのためには、適切な実験装置の検討がなされ
なければならないとして、いくつかの効果的な実践例を示している。

1 はじめに

中学校理科では自然現象を統一的にとらえる手がかりとして、エネルギー的な見方、考え方の指導が重視されている。われわれは既に、力学現象、熱現象を探究する過程をとおしてエネルギー概念を育成する指導の実践研究を積んできた。

このたび、さらに電磁気現象のうち、特に電流と磁界の相互作用を取り上げ、その探究をとおして、エネルギー概念の拡張をはかる指導を実践的に研究したので報告する。

2 指導計画作成に当たっての基本的な考え方

指導計画の作成に当たって、われわれは次の3点を特に重視した。これはまた、われわれの事前の研究に基づく研究仮説でもある。

(1) 生徒の学習能力の発達段階と素材の教材性とを結びつけた学習内容の精選とその順序性の重視

指導計画を作成するに当たって、われわれは理科教材の内容を概観し、その中における「電流と磁界の相互作用」の教材の位置づけ、並びに、そこに流れているいくつかの基本的概念と、それに導かれる基礎事項の関連を調べ、これを精選して、教材を構造化することにした。

一方、われわれは、生徒が自然確認を深めていく場合、現象の観察によって得た情報を制御して規則化していく過程（探究の過程）を通ることが、効率が高いと判断した。よって、生徒のレディネス、学習能力に応じた探究の過程を考えて、学習内容を精選し、順序性を重視していくことにした。

(2) 生徒の興味を喚起し、生徒が問題意識を持って探究を志向するような現象提示による導入

われわれは、生徒に疑問と興味を持たせ、探究を志向する情操を持続させるためには、強い感動を与える問題提示が必要であり、そのためには、提示する問題が次の3点、すなわち、① 半知半未知的な要素（既有知識のみでは解決できないが、学習によってなんとか解決できそうな可能性を秘めている）。

1 新潟県立教育センター

2 新潟市立第一中学校

3 長岡市立宮内中学校

4 十日町市立中条中学校

② 矛盾を感じさせる要素, ③ 単元の全学習内容にかかわり合いをもつこと, を兼ね備えていることが望ましいと考えた。

(3) 探究の過程において, 生徒が明確な現象を観察できる実験装置の準備

電流と磁界の相互作用は生徒の認識している相互作用とは異質なものである。それを生徒に知らせるには明確な実験による事実を示すのが最善であると考えた。そのために, 実験装置をじゅうぶん検討して実践することにした。

3 指導に当たってのエネルギー概念のとらえ方

「電磁気とエネルギー」の指導に当たって, これまでに述べた「エネルギーと仕事」²⁾³⁾に続いて, 「電気エネルギー」, 「電流と磁界の相互作用にかかわるエネルギー変換」を次のようにとらえた。

(1) 電気エネルギー

電気教材では, 力学教材のように巨視的な立場から, いわゆる「電気エネルギー」と称することができるとは見出せない。そこで微視的な立場で考察してみた。

そこでは重力場において物体の移動に伴って位置エネルギーが他のエネルギーに変換することを見てきたように, 電界の中に置かれた電荷が, 異なる電位の間を移動するときに, 電氣的な位置エネルギーが, 他のエネルギーに変換されるものと見ていく。例えば, 電池によって多くの電荷が位置エネルギーを得るが, それらの電荷は回路を流れる間にその位置エネルギーを内部エネルギーや力学的エネルギーに変換する。そのときに温度上昇や, 導線の移動などの現象が見られる。従って, われわれはこのような電界における電荷の電氣的な位置エネルギーを「電気エネルギー」と仮称し, 電気エネルギーの変換量を測る「ものさし」として, 異なる電位間の差(電位差)と, 移動した電荷の電気量(電流)×(時間)の積を用いることにした。(電気エネルギーの変換量)=(電位差)×(電流)×(時間)

(2) 電流と磁界の相互作用にかかわるエネルギー変換

電流と磁界の相互作用は, 本来, 電流による磁界と他の磁界による場と場の相互作用である。そして, 場の概念はまた, 自然を統一的に見る重要な基本的概念の一つである。しかし, 場の概念は抽象的で生徒には理解しにくい概念であるから, 特に, 現象の探究による実験事実に基づく概念形成を重視した。従ってエネルギー変換については, 専ら巨視的な立場における状態の変化を追求し, それに伴ってエネルギーが変換することを定性的にとらえさせることにした。

4 指導計画

(1) 生徒のレディネス

この学習に関連するレディネスは次のとおりである。

○磁石のはたらき	・磁石の反発・吸引, 磁石の力, 磁石の遠隔力小8, 中1
	・鉄の磁化小8
○電流の磁気作用	・電流と磁針のふれ(現象のみ)小4, 小6
	・巻き数や電流の大きさと電磁石の強さ小6

(a) レディネス調査

指導計画作成の資料とするため、上にあげたレディネスについて調査した。

調査問題

- (1) 図のように磁針に棒磁石を近づけたとき、磁針のN極はどうなるか。よいと思ったものに○印をつけよ。

ア. 近づく、イ. 遠ざかる、ウ. 動かない、エ. その他
また、その理由を書け。

- (2) 次の中から、磁石に引きつけられるものを選んで○印をつけよ。

ア. 鉄、イ. アルミニウム、ウ. 銅、エ. 磁針のケース

- (3) 図のように磁針の上の導線に電流を流したとき、磁針のN極はどうなるか。よいと思ったものに○印をつけよ。

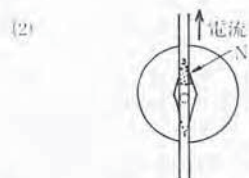
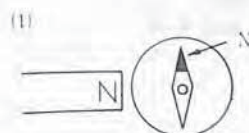
ア. 右に動く、イ. 左に動く、ウ. 動かない、
エ. 向きはわからないが動く

次に、電流を反対に流したらどうなるか。

カ. 反対向きに動く、キ. 同じ向きに動く、ク. 動かない

- (4) 強い電磁石を作りたい。〔 〕の中から適当なことを選んで記号を（ ）の中に入れよ。同じ記号を何回使ってもよい。

- | | |
|----------------|--|
| ① エナメル線の巻き数（ ） | 〔ア. 多くする、イ. 少なくする、
ウ. 入れる、エ. 入れない、
オ. 関係ない、〕 |
| ② コイルに流す電流（ ） | |
| ③ 鉄心（ ） | |



(b) 解答結果

A校の正答者の百分率は次のようであった。すなわち、

- (1) 92%, (2) 87%, (3) 6%, 100%, (4) ① 75%, ② 58%, ③ 64%,

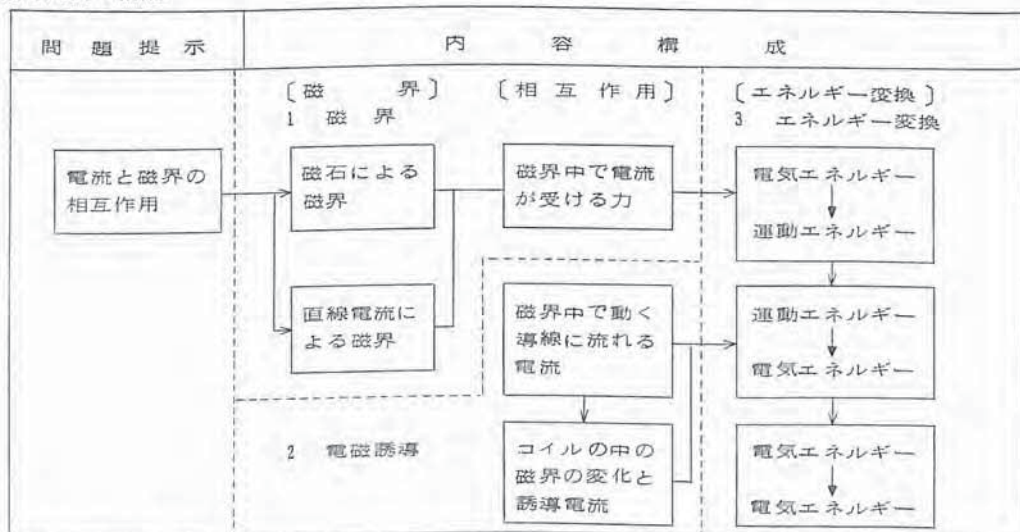
正答率の低かった(3)について、別の観点、すなわち、動くか動かないかの判断だけにしぼってみた場合、動くかと判断した生徒が21%、動かないと判断した生徒は79%であった。そして、動かないと判断した根拠を調べたところ、ほとんどの生徒が、「電流が磁石のN極を引く。」と答えていた。

(2) 指導目標

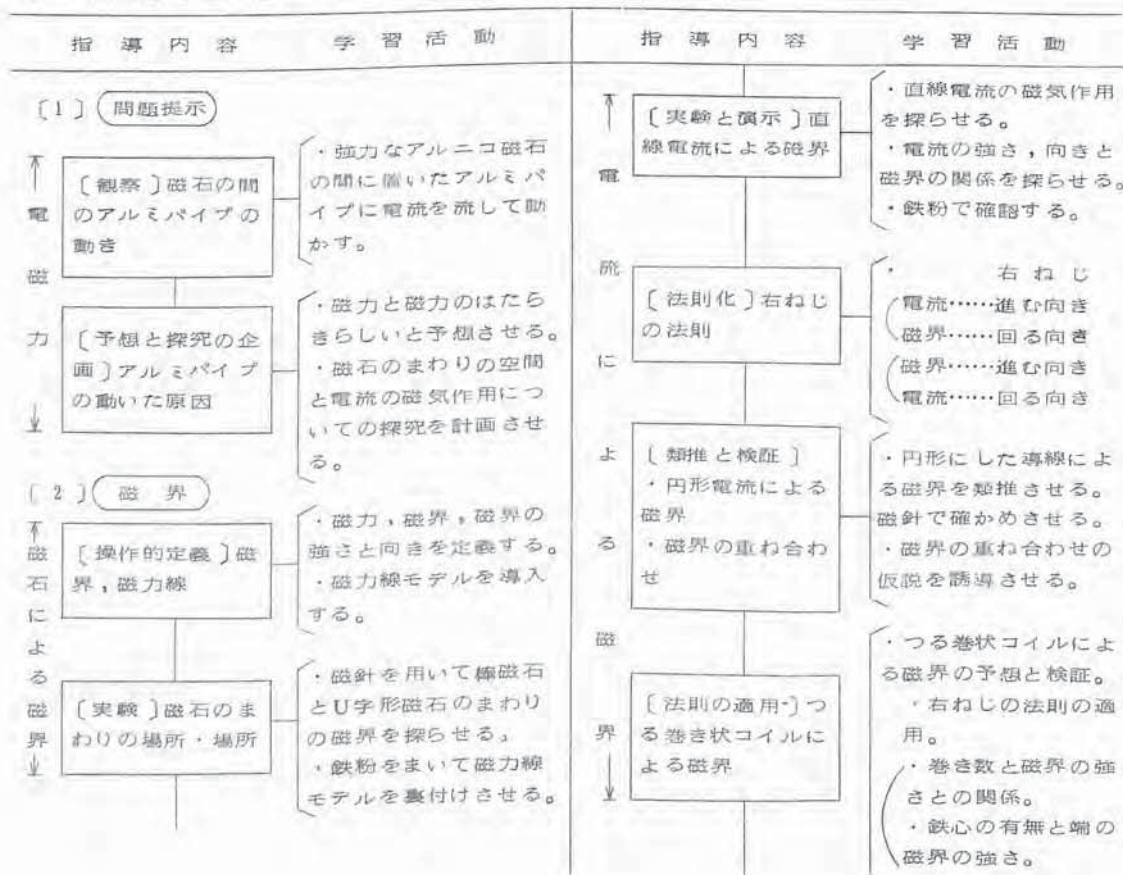
われわれは、電流と磁界の相互作用についての指導を次の5つにきめた。すなわち、

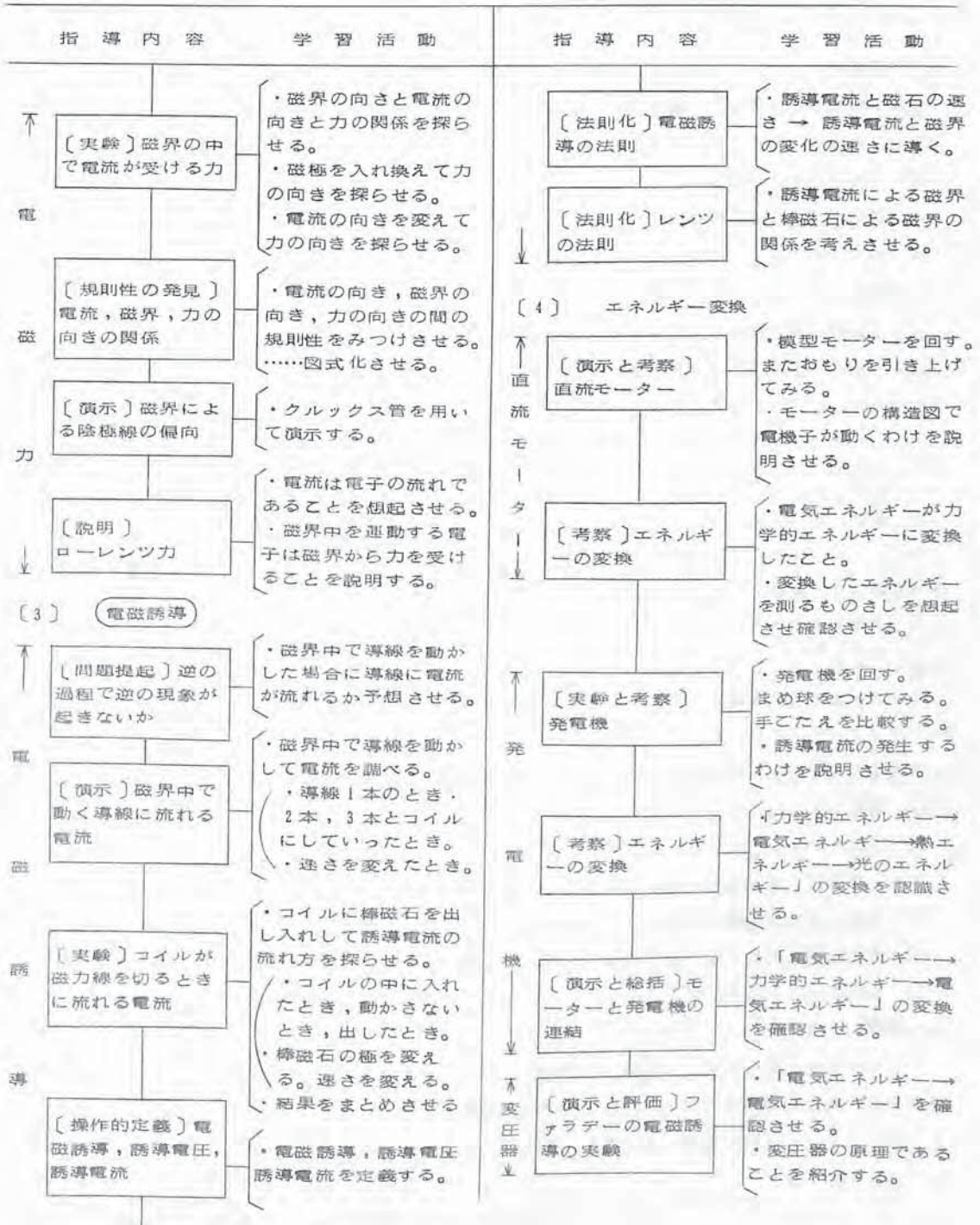
- ① 磁界、磁界の強さ、向き、及び磁力線などについて知らせる。
- ② 電流は磁界をつくること、及び、電流の向きと磁界の向きとの間に、規則性があることを発見できるようにする。
- ③ 磁界の中の導線に電流を流すと、導線は力をうけ、磁界の向きと電流の向きと力の向きとの間に規則性があることを発見できるようにする。
- ④ コイルに磁界の変化を与えると、コイルに誘導電流が流れ、誘導電流の流れる向きや大きさと磁界の変化との間に規則性があることを発見できるようにする。
- ⑤ エネルギー変換の立場から、モーター、発電機、変圧器のはたらきを説明できるようにする。

(3) 指導内容の構成



(4) 指導内容と学習活動





5 実践

(1) 問題提示

電流と磁界の相互作用の実験を見せ、学習の動機づけをする。そのために提示する実験の持つ問題の要素を次の8点にしぼった。すなわち

- ① 半知半末知的な問題
- ② 矛盾を感じさせる問題
- ③ 単元の全内容にかかわり合いをもつ問題

(a) 磁界の間のアルミパイプの動き

演示実験用器具は図1に示す装置である。

最初、磁石を置かないで直流電流を流したとき、導線のまわりに磁界ができることを確認する。

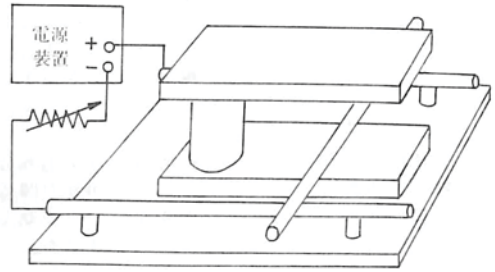


図1 問題提示のための演示実験

T このあたりに磁界はあるか。

C₁ この辺ですか………あります。

T そう、説明してみてください。

C₁ 電流がこの方向に流れているので、この場所

ならこう回って………よくわかりません。

T 磁界があることはどうすればわかるか。

C₂ 磁針を持ってくればわかります。

次に、アルニコ磁石を図1に示すように置いて電流を流し、アルミパイプは電流の流れているときだけ一定の向きに運動することを演示する。

T さあ、よく見ていろよ。

C あっ、動いた！

C どうして動いたんだろう。

ニクロム線の抵抗を減らして電流を増していくと、ころころとよく動いた。

T 坂になっているかな。

G ちがう。

T 動いた向きをきちんと書いておけよ。

(b) アルミパイプの動いた原因を探究する計画

アルミパイプの動いた原因についてグループ討議をさせた結果、次の2つの予想がでてきた。

- ① 電流を流したらアルミパイプが磁石になった。
- ② アルミパイプのまわりに磁石のような何かができて、それが磁石から磁力を受けた。

これらの予想を確かめるために次の3つの実験を計画した。

- ① 棒磁石やU字形磁石のまわりの場所場所の磁力の様子を調べる。
- ② 電流を流したときのアルミパイプは磁石になるか調べる。
- ③ 電流を流したときのアルミパイプのまわりの場所場所の磁力の様子を調べる。

(2) 磁界

ここでは磁針が動く場所を「磁界」と操作的に定義し、磁界の様子を磁針で探り、磁力線を磁界の向きから操作的に定義する。同じような方法で直線電流(アルミパイプ)のまわりの磁界、円形電流やつの巻き状コイルに流れる電流による磁界を調べる。

(a) 磁界と磁力線

磁石についてのレディネスに基づいて、磁石が反発したり引きあったりする力を磁力、磁力がはたらく空間を磁界、また磁石に磁針を近づけたとき磁針のN極が指す向きを磁界の向き、磁針に及ぼす磁力

の強さを磁界の強さ、とそれぞれ操作的に定義した。そして棒磁石とU字形磁石の磁界をはっきりとは握させるために、磁針を使って磁界の方向を連ねて、曲線をえがく実験を組んだ。（図2）この曲線を磁力線と操作的に定義した。

実験から棒磁石とU字形磁石の磁界を示す磁力線が数本得られた。

うまくえがかれた○班の棒磁石のデータをトラベンアップにかけてTPをつくった。それをOHPにかけて、

T これは○班のデータだ。このようにならなかったところは手を上げてみよう。

挙手した△班のデータをOHPにかけた。その磁力線はゆがんでいた。

T △班は磁石をどんな位置に置いたのか。

C₁ こうです。………Nが東です。

T ○班はどんな位置に置いた。

C₂ Nが北です。

T 棒磁石の置き方で、どうして磁力線が変わるのかな。

C ………

地磁気の影響に気がついた生徒はなかった。そこで地磁気の説明をした。（地球は北がNだと知っている生徒がかなりあった。）

磁力線の性質については上の2点にとどめた。

次に磁力線のえがかれた用紙を、それぞれの磁石の上に、まえの実験の位置に合わせて置き、鉄粉をまいて、鉄粉の配列とえがいた磁力線が重なることを確かめさせた。

(b) 磁力線についての誤解

磁力線は磁界の表現法であるが、ややともすると、鉄粉の配列そのものが磁力線であるとか、磁針は磁力線に沿ってふれるなどと誤解されがちであったので、注意深い指導が必要であった。

(c) 直線電流による磁界

生徒が予想したアルミパイプの磁化には2つあった。一つはアルミパイプ自身に鉄くぎがくっつくこと、他の一つはレディネス調査にみられたように、流れる電流の方向に磁針のN極を引きつけることである。これらの考え方を是正する目的で、アルミパイプの磁化、及びアルミパイプのまわりの磁界について調べる実験をすることにした。

T このまえ、電流を流すとアルミパイプが磁石になるのではないかという予想がでたが、それを確かめる方法はないか。

C₁ 小さなくぎやクリップをアルミパイプの先につけてみます。

T 先か。（C₁は棒磁石に類似したものを考えている。）

C₂ アルニコ磁石から力を受けたのはパイプのまん中だから、まん中でいいと思います。

C₃ 電流が流れている導線を考えると、どこも同じだと思います。

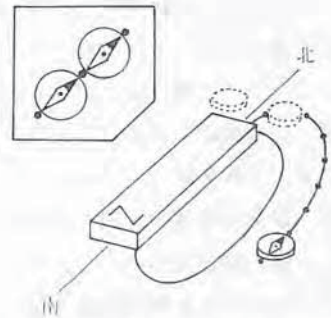


図2 磁界を磁力線でえがく

T いろいろな磁力線がでてきたが、この中から磁力線の性質を探してみよう。

C₃ NとSを結んでいます。

C₄ 切れているのがあります。

C₅ 遠くでつながっていると思います。

T どうもそうらしい。それでは、磁力線はNから出てSに入ると約束しよう。

T ほかにないかな。

C₆ （小さな声で）交わっていない。

T はい。彼はいま、いいことをいった。そうだ、そのとおりだ。磁力線は交わらない。

T 次にアルミパイプのまわりの場所場所を調べる方法はないか。

C₄ 磁針とか鉄粉で調べます。

T いちばん始めの調査で、電流の流れる向きに磁針のN極が引きつけられると答えた人が多かったが、そのことの確かめも含めて実験方法を計画して下さい。

C₅ アルミパイプを横に置いて、上下左右に磁針を置いてみます。

C₆ アルミパイプをたてにして、空間的に調べたらおもしろいと思います。

話し合いで次の3つの実験を計画した。

- ① 電流が流れている導体が磁石になるかどうかは、くぎをくっつけて調べる。(図3(a))
 - ② 直線電流のまわりの各場所の磁界(向き)を磁針で調べる。(図3(b))
 - ③ 磁界を立体的に調べるために磁針を使って磁界を表現する磁力線をえがく。(図3(c))
- ①～③とも電流の強さを1 A, 5 Aと変えてみる*。
②, ③とも電流の向きを変えてみる。

生徒実験に先立って、回路づくりを次のように演示した。

- ① 電源装置の定格いっぱいまで電流をコントロールするために、ニクロム線と電流計を直列に回路に入れること。
- ② 電流の強さを変えるには、ニクロム線の長さを変える方法と、電源電圧を変える方法とがあること。
- ③ 電源電圧のほとんどがニクロム線にかかって、アルミパイプにはかからないことを電圧計で確認し、電気エネルギーのほとんどはニクロム線で熱エネルギーに変換することを知らせた。

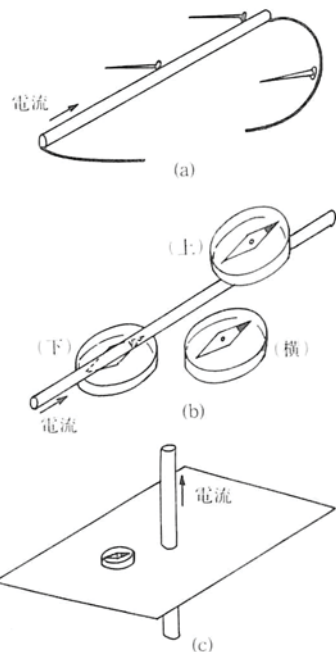


図3 直線電流による磁界を調べる

生徒の実験結果から次のような話し合いに入った。

- | | |
|--|--|
| T アルミパイプは鉄くぎを引きつけたか。 | C はい。 |
| C いいえ。 | T 磁針で調べた磁力線の様子はどうか。 |
| T 磁針は電流の流れる向きを向いたか。 | C ₃ 電流をぐるぐるまわるような磁力線です。 |
| C いいえ。 | T 磁石の磁力線と、同じか、違うか。 |
| T 磁針の動き方について詳しく発表してください。 | C ₃ 違う。 |
| C ₁ 電流が5 Aのときによく動いた。 | T みんなも認めるか。 |
| C ₂ アルミパイプと直角に向いた。 | C はい。 |
| T アルミパイプの方を向かないということは、アルミパイプが磁石になったのではない証拠か。 | T それでは、電流の向きと磁力線の向きの間に規則性があると思うか。表現してみたまえ。 |
| | C ₄ あるようですが、表現できません。 |

ここで、右ねじモデルをもちだして、法則化に導いた。モデルによる法則化の方法は、正確な内容の理解ができるから、運用に便利であり、記憶の持続性を計ることができる長所をもつ。反面、モデルに頼りすぎて、ややともすれば現象よりモデルが優先するという本末転倒の可能性もないとはいえない。ここでは理科の学習はあくまでも自然現象があつてのモデル化であることを強調した。

次に直線電流による磁界の様子を鉄粉で演示し、導線自身が磁石になるのではなく、そのまわりの空間が同心円状に鉄粉に磁力を及ぼすことを確認した。

(d) 円形電流による磁界

* この実験は電流が強くないと磁針のふれが悪く、明確な現象の観察ができない。そのため、電源装置は、定格いっぱいまで安心して使えるもの。また、誤って定格をオーバーしたときは、ヒューズの代りにブレーカーが入っていて、回路が一時切れるが、ワンタッチで復帰する方式のものが望ましい。

直線電流のまわりの空間に存在する磁界の認識から発展して、1回巻きの導線に電流を流したときの磁界を予想させた。予想は次のステップを踏んでなされた。

- ① 直線電流のまわりの磁界をくると導線に従ってまわしたような磁界ができる。
 - ② そのときは、前と違って磁力線と磁力線がぶつかるだろうが、それはどう考えたらよいか。
- 予想と、それにかかわる問題が提起されたので、演示に入った。

装置はOHP投影用として自作したものである。（図4）

最初、磁針でパラガラス上の場所場所の磁界の向きを探らせ（磁力線をえがく要領で）。次に電流の向きを変えて同様の探りを行い、磁界の向きが逆になることを確認させた。

次に鉄粉で、平面的に磁界の様子を演示し、生徒にノートにスケッチさせた。

予想でてきた問題を解くために、別に導線を中心にした同心円をそれぞれ数本ずつえがかせ、磁力線の向きを矢印で入れさせた。導線からの距離が異なるので、磁界の強さも異なる。従って、単純に矢印の加減算をやることはできないが、傾向として、矢印の和は強くなり、差は弱くなることを認めさせ、ここで考えた磁界がパラガラス面を横切る2本の直線電流による磁界を重ねあわせたものであると説明した。

また、コイルの中心部の磁界の向きから右ねじの法則の適用を確認しあった。（図5）

(f) つる巻き状コイルによる磁界

電流による磁界の重ね合わせの総括として、つる巻き状コイルによる磁界を取りあげた。

(3) 相互作用

始めの問題提示に演示したアルニコ磁石とアルミパイプの実験を、ここでは生徒実験に組んで、磁界、電流、力の3つの間の関係を調べて規則性を発見させた。ほとんどの実験は「予想 → 実験」と進むが、ここでは予想を要求することは無理である。あえて予想させたところ、図6(a)のように、直線電流のまわりの磁界をU字形磁石に置きかえて力を予想する場合と、(b)のように、磁界を重ね合わせてできた磁界の傾きから力を予想する場合があった。だが(a)は力学で説明のつかない現象を無理に力学で説明づけようとする発想であり、(b)は磁界の傾きを作った電流が磁界から力を受けるという高度な理論になる。従って、ここでは、磁石による磁界と電流による磁界を近づけたら、何か力がはたらくのではないか、という問題提

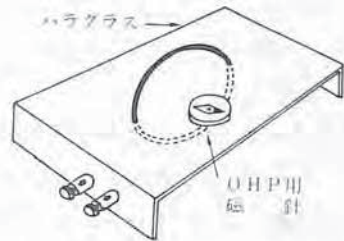


図4 円形電流による磁界を調べる

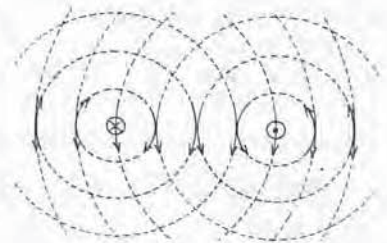


図5 磁界の重ね合わせ

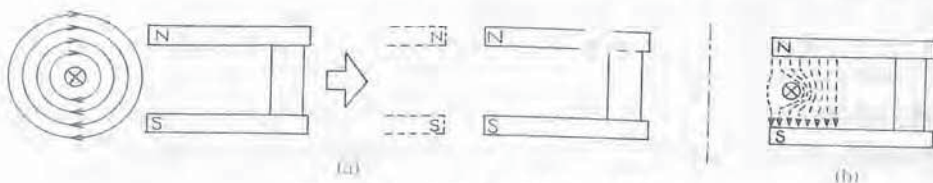


図6 アルミパイプが動いた理由

起にとどめ、現象の探究から規則性の導出にかかった。

(a) 相互作用

磁界、電流、アルミパイプの運動、それぞれの向きの間にある関係を調べる方法を列挙させた。

生徒から出された方法は次の5つであった。

- ① 電流の向きを入れ換えて、アルミパイプの動く向きを調べる。
- ② 磁界の向きを入れ換えてアルミパイプの動く向きを調べる。
- ③ 電流の向き、磁界の向きの両方を同時に入れ換えてアルミパイプの動く向きを調べる。

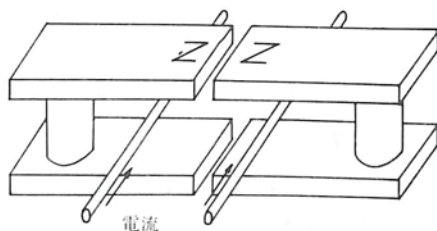


図7 磁石を入れ換える

- ④ 磁石の入れ方を逆にしてみる。(図7)

- ⑤ 磁石の中の導線を置く位置を変えてみる。(図8)

T ここにあげた方法で実験した場合の結果を予想しよう。

C₁ ①では運動する向きが逆になるだろう。

C₂ ②で、やはり逆に動くと思う。

C₃ ③のように両方逆にしたら動き方はまえと同じになると思う。

C₄ ④では磁界の向きは同じだから、同じだろう。

C₅ ⑤はa点とb点とは逆向きの動き方をするのではないか。
ここで、間違った予想なので⑤について、理由を問うところ、

○磁石は極(先の方)がいちばん磁力が強い。

○導線に電流を流すと磁力によって、aは内側に、cは外側に押しやられる。

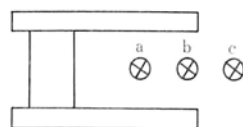


図8 導線を置く位置

という答えがかえってきた。おそらく、彼は磁極と電流の流れている導線の間に斥力がはたらくであろうと判断したからであろう。

ここで、実験方法を確認して実験にとりかからせた。

生徒実験終了後、磁界、電流、運動のそれぞれの向きが直交することを確認するために、更に磁石と平行に置いた導線(図10)の場合、斜めに置いた場合について演示して、データをまとめさせた。

生徒がまとめたデータの内容は次のようであった。

- 導線にはたらく力の向きは、電流の向きによって変わる。
- 導線にはたらく力の向きは、磁界の向きによって変わる。
- 導線にはたらく力の向きは、電流の向きと磁界の向きを同時に変えたときは変わらない。

- 導線にはたらく力の向きは、磁石の入れ方(図7)を変えても変わらない。(磁力線が変わらないから)
- 導線にはたらく力の向きは、磁石の中の導線の位置を変えても変わらない。
- 磁界の向き、電流の向き、力の向きはそれぞれ垂直である。(磁界と電流が水平のときは動かない。また、斜めのときはよく動かない)

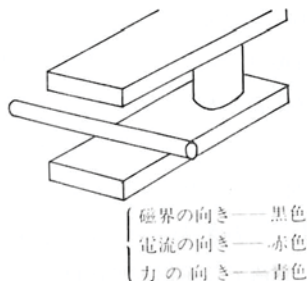


図9 記録用紙の図

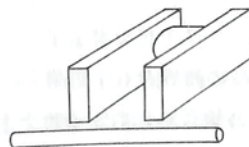


図10 磁界と電流が平行な場合

(b) 規則性の発見

実験データは一見ばらばらであるが、整理をさせて、規則性を発見する学習活動に入った。

T 電流の向き，磁界の向き，力の向きの間にどんな関係があるか考えてみよう。3つの間の関係だぞ。

もし5分間で考えられないときにはヒントを与えるよ。できるだけヒントをもらわんようにがんばれ

グループごとに熱心に話し合って何とか規則性を発見しようと努力していた。

T ヒントを貰いたいところはどこだ。

C₁ はい。（C₁のグループから手が上がった。）

T （そのグループのそばに行つて）油粘土に3本の色鉛筆をとめて考えてみよう。

T はいやめて。ではどんなことがわかったか説明して下さい。

C₂ 3つの向きを1つの図に書いて、くるくると回してみると全部同じ形になった。（図11(a)）

T 3つの向きはいつも同じ関係にあるとってよいか。

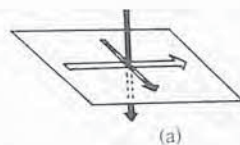
C₃ はい。私達のグループは直方体の箱に3つの向きを移して考えましたが、どれも同じ関係になりました。（図11(b)）

C₄ 色鉛筆を油粘土でとめて考えたが、やはり同じ関係といえる。

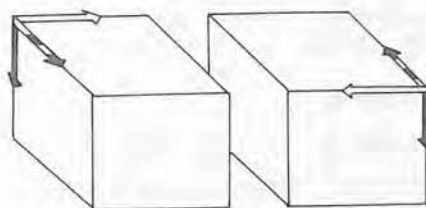
C 実験ではいろいろあったようだがモデルで見ると同じだ。

T そうすると、はたらく力の向きは、電流の向きと磁界の向きによって決まるといってよいか。

C はい。



(a)



(b)



(c)

図11 生徒たちの考えた思考モデル

T この3つの垂直にはたらく力の向きをわかりやすく左手の指で示した人がいた。

フレミングの左手の法則をTPで紹介した。

C あっ。見たことがある。

(c) 磁界による陰極線の偏向

フレミングの法則で表現される電流，磁界，力のそれぞれの向きが，陰極線（電子の流れ）でも適用できることを確認させる意図でクルックス管による陰極線の偏向を取り上げた。

クルックス管は2年で扱い，生徒は陰極線は電子の流れであることを知っている。従って，電子の流れと電流とは向きが逆であることを確認してから，偏向する向きを予想させて演示した。ほとんどの生徒は正しく予想していた。

(d) ローレンツ力

クルックス管の実験で，生徒は，電流の流れる向きと電子の流れる向きが反対であることを確認した。そして，電子が磁界から力を受けていることを理解した。

そのために，アルミパイプや導線が力を受けたという認識がくずれ，力を受けたのは「物自身」でなく，その中を流れている電子であると，考え方を修正した。（図12）

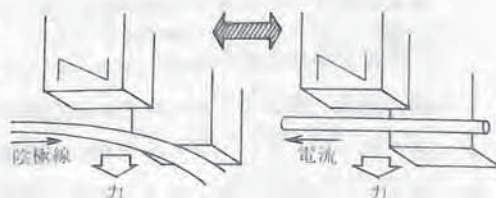


図12 ローレンツ力

そこで改めて，「磁界に直角に運動する電子は磁界と力を及ぼしあう。」といい直して，磁界の向き，電子の流れる向き，力の向きの関係を整理させ，ローレンツ力の考えを導入した。（用語は使わない）

ローレンツ力の導入で生徒には次の新しい疑問が生じた。すなわち、

① 電子(粒子)が走ると本当に磁界ができるのだろうか。そのモデルをどのようにとらえたらよいのだろうか。

② 電子が走ったくらいで、磁針を動かす力が出るのだろうか。

であった。これらの疑問には次のような指導をした。

① 船が走ると波が立ち、船が止まれば波もそれ以上できない。また一度作られた波はしだいに広がっていく。このことと電子の運動による磁界を対比して考える。

② たくさんの空気の粒子がわれわれに衝突すると、われわれは圧力を感じると同じように、たくさんの電子が力を及ぼすことを説明し、 1mm^2 の銅の導線中には電子(動く電子)が 8.5 億の 1 億倍の、そのまた 1 千倍あることを紹介する。

(4) 電磁誘導

磁石の磁界に垂直に流れる電流が、磁界と力を及ぼしあう現象の逆、すなわち、磁界の中で導線を動かした場合に、導線に電流が流れるかという疑問と興味から現象の探究にかかり、発見された諸現象を操作的に定義させながらそれらの間の規則的な関係(レンツの法則、ファラデーの電磁誘導の法則)を発見させる。

(a) 逆の過程で逆の現象が起きないか。

問題提起として、アルニコ磁石、導線、検流計などを用意して、次のように問いかけた。

磁界の中で導線に電流を流す	→	導線は力を受けて動く。
磁界の中で導線に力を加えて動かす	→	導線に電流が流れるか?

生徒の中には流れないと判断したものが多かったが、流れると判断したものもあった。流れないと判断した理由は「電源がないから」であり、流れると判断した理由は大体、次の2つにまとめられた。

○ 自転車の発電機と仕組みが似ているから。

○ 理由ははっきりいえないが、3つの間の相互作用の関係から流れそうだ。

ここで、アルニコ磁石の中へ導線を1本出し入れして、検流計の指針を見つめさせた。その結果生徒はわずかであるが検流計の指針が動いたのに驚いた。

C もっと針が大きく振れるといいのに。

T そうだね、導線を輪にして2本、3本……

にしたら大きく振れるだろう。

C あっ、少しずつ大きく振れてきた。

C₁ 先生、もっと速く動かして下さい。

あっ、大きく振れた。

生徒は検流計の針が振れたことから、導線に電流が流れたことを認めた。そこで、電流が流れた理由を考えさせた。

T それでは、電流が流れた理由を考えてみよう。

電流を流すはたらきをなんといいますか。

C₁ 電圧。だけどなんで電圧が生じたのかな。

T 先生が導線を動かしたでしょう。そのとき変

化したものはなんだろうか。

C₂ 磁石の中にある導線の位置。

T そう。そのときの磁力線と導線の関係は。

C₂ ぶつん、ぶつんと切っています。

討議の結果、電流が流れるためには電圧の発生が必要であり、電圧が発生する理由として導線が移動して磁力線を切ったこと以外には考えられないと結論づけた。

(b) コイルが磁力線を切るときに流れる電流

導線が磁力線を切る現象をもっと詳しく調べるために、コイルに棒磁石を出し入れして、流れる電流を、 1m 以上離れた検流計(または、マイクロアンペア計)で調べる実験に入った。

実験する内容

- ① コイルの巻き方，検流計の極を調べる。
- ② 棒磁石のN極をすばやくコイルの中に入れ，そのときの検流計を見る。
- ③ 磁石をコイルの中に入れたままにして，検流計を見る。
- ④ N極をすばやく引き出し，そのときの検流計を見る。
- ⑤ ②～④をS極でやってみる。
- ⑥ 出し入れの速さを変えて，検流計の振れの大きさを比べる。
- ⑦ 磁石をコイルの上で左右に振りながら，検流計を見る。
- ⑧ ⑦まで終った班は，自分たちで問題をつくって実験する。

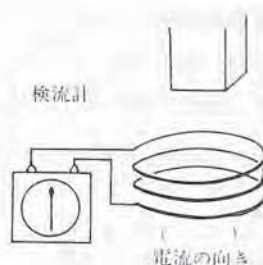


図13 電磁誘導実験の記録用紙
実験してわかったことを記録するために図13の図を6個用意した。それらの図に記録したことがらをまとめさせ，その他の自主実験も含めて発表させたところ，次のデータが得られた。

N極	入れる	出す	電流の向き関係
S極	入れる	出す	→ : 逆向き
			--- : 同じ向き

○コイルの中でも外でも，棒磁石を動かささえすれば電流は流れ，棒磁石を止めると電流は流れなくなる。

また，⑧については，次の3つができた。

- ア．磁力の強い磁石を使うと強い電流が流れる。
 - イ．コイルの巻き数を多くすると強い電流が流れる。
 - ウ．磁石の出し入れを速くすると強い電流が流れる。
- この実験結果から次の2つの課題を設定した。

- ① どんなときに電流が流れるか。
- ② 流れた電流の向きに規則性はないか。

(c) 電磁誘導の法則

「コイルが磁力線を切る」という認識から「コイルの中の磁界が変化する」という認識へ移行させるために，1回巻きコイルに磁石のN極を近づける場合をOHPで投影し，コイルが磁力線を1本切ることにより，コイルの中の磁力線が1本ずつ増すこと，次に逆にN極が遠ざかるときは，コイルが磁力線を1本切ることにより，コイルの中の磁力線が1本ずつ減ることを確認させた。（図14）

一方，磁石が近づくことは磁界が強くなり，遠ざかることは弱くなることから，それらをまとめて，次の表を得た。

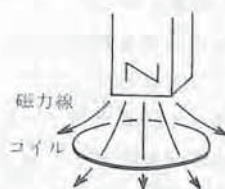


図14 磁界の変化

現 象	モ デ ル
磁石が近づく → 磁界が強くなる	コイルが磁力線を切る → <ul style="list-style-type: none"> コイルの中の磁力線が増す コイルの中の磁力線が減る
磁石が遠ざかる → 磁界が弱くなる	

そして，磁界が強くなったり，弱くなったりするたびごとに，モデルでは，コイルが磁力線を切り，その数が増したり減ったりすることを説明して，電磁誘導の問題提起で演示した実験の，電流の流れる理由を次のように確認させた。

- 導線や検流計を含めた回路 → 1回巻きコイルと考える。

○ 1 回巻きコイルと磁石の距離が変わる → コイルの中の磁界が変化する → コイルに電流が流れる

(d) 電磁誘導の現象の定義(省略)

(e) 電磁誘導現象の確認

実験から得られたデータのうちから「コイルの中の磁界が変化する → コイルに電流が流れる」で説明のつく現象を拾いあげて考察させ、ファラデーの法則に触れた。前に記入したTPを投影しながら、

T コイルの中で磁石を出し入れすると磁界が変化することは確認したね。

C はい。

T コイルの上で磁石を左右に振ったとき、磁界は変化するでしょうか。

C₁ 横に近づいたり、遠ざかったりするから。

C₂ 磁力線を書くと、コイルがぶつぶつ切るのがわかります。……磁界の変化になります。

T 今度は磁導電流の強さについて考えよう。強い磁石をコイルの中に出し入れたとき強い電流が流れるのはどうしてでしょう。

C₃ 強い磁石は磁界が強いから、同じ動きでも変化が大きい。

T コイルの巻き数が多いほど誘導電流の強いのはどうしてでしょう。(発言がなかったので) ヒントを出そう。1 回巻き当りの誘導電圧は

同じとして、巻き数が多いということは電池で考えたら、どうなるでしょう。(図15)

C₄ わかった。直列だ。

C₅ 電圧が高くなる。

T 誘導電圧が高いとどうなりますか。

C₆ 強い電流が流れる。

T それでは最後の一つ、出し入れを速くすると。

C₇ 磁界の変化が大きい。

T 同じ変化の大きさでも、速く変化するのと、遅く変化するのと、つまり変化の速さで考えたら、この場合はどちらになるでしょう。

C₈ 変化の速さが速い場合。

T そう。まとめると、誘導電流の強さは、磁界の変化の速さが速いほど強い。

(f) レンズの法則

コイルの中に棒磁石を出し入れした運動の向きと、流れる電流の向きを記録したデータを使って、それらの間にある規則性を探るために、次の手順に必要なことがらを更に記入させた。

- ① 棒磁石による磁力線を実線の矢印で記入する。
- ② コイルに流れた誘導電流の向きの矢印を確認する。
- ③ 誘導電流によって出来る磁界を磁力線(点線の矢印)で表示する。
- ④ 棒磁石がコイルに近づくときと、遠ざかるときに分けて、①と③の磁界を重ね合わせ、その傾向を調べる。

この作業課題中の③については生徒は驚いた。生徒は棒磁石の出し入れに伴って誘導電流が流れることは現象から理解したが、それによって、また磁界が発生するとは思っていなかったようであった。

作業終了後、得られたデータをもとに問答を重ねて、わかったことがらをまとめて、図16の概念図を作成した。

この概念図から次の関係を導き出した。

	コイルの中の磁界	誘導電流による磁界の向き	両者の関係
磁石を入れる	強くなる	弱くする向き	逆向き
磁石を遠ざける	弱くなる	強くする向き	逆向き
	↓	↓	
	(変化する)	→ (妨げる向き)	

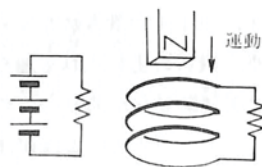


図15 巻き数と誘導電圧

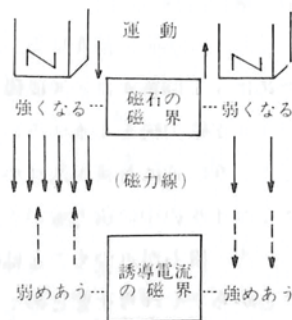


図16 レンズの法則概念図

この関係がS極の場合にも成り立つかどうか検討させて、レンツの法則とした。

レンツの法則は見方を変えるとエネルギー保存則になる。誘導電流を流すためには磁界の変化の妨げをおしきる力学的エネルギーが必要である。そこで、次のような話し合いを通して、エネルギー的見方、考え方の学習に移った。

T レンツの法則では磁界の変化を妨げる向きに誘導電流が流れるとあるが、実験のときどうだったかな。

C₇ 力なんか感じなかった。

T どうしてだろう。

C₈ 誘導電流が弱いから。だって、検流計がやっと振れるくらいですから。

T 強い誘導電流を流す装置を知っているか。

C₉ 自転車の発電機。

C₄ 先生、電気をつけて走ると重く感じます。エネルギーがいります。

T いいことをいったな。これから、この単元で学んだことがらを応用した機械について、エネルギー的な見方で見ていこう。

(5) エネルギー変換

モーター、発電機、（ファラデーの電磁誘導の実験装置）を実際に動作させて、動作原理を考察することと、併せてその現象をエネルギー的にとらえさせ、エネルギー概念の拡張をはかる。

(a) 直流モーター

模型モーターを電池で回し、エネルギー変換の立場からこの現象を考えさせた。

討議の結果、次のような変換経路を作成した。すなわち

（電池が化学変化する）（モーターが回転する）（おもりの位置が変わる）

「化学的エネルギー」→「電気エネルギー」→「回転のエネルギー」→「位置エネルギー」

（上は状態変化、下はエネルギー変換）

この変換経路に出てくる電気エネルギーと、熱エネルギーの変換量を測る「ものさし」を次のように確認した。

「電気エネルギー」の変換量を測る「ものさし」→「電圧」×「電流」×「時間」

「力学的エネルギー」の変換量を測る「ものさし」→「仕事」（＝「力」×「距離」）

(b) 発電機

「ダイナモ」という商品名の発電機を生徒に持ってこさせ、次の実験を代表の生徒に演示させた。

① まめ球をつなずに発電機のハンドルを回す。

② まめ球をつないで発電機のハンドルを回す。

T ダイナモを回してみても、まめ球をつけないときと、つけたときとで、手ごたえはどうか。

C₁ つけたときに重くなった。

T エネルギーで説明したらどうか。

C₂ 回転のエネルギーの一部分が電気エネルギー、それから熱や光のエネルギーになった。そのぶんだけ重くなった。

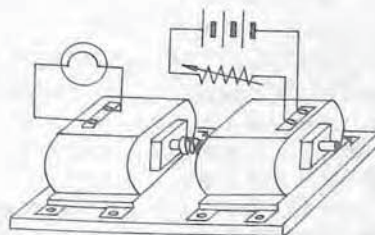


図17 エネルギー変換

次に図17に示すように、2台の模型モーターの軸をスプリングジョイントで連結して、1台のモーター（モーター1とする）に電流を流して、勢いよく回した。しばらくしてから、いま1台のモーター（モーター2とする）の端子にまめ球を接続して点灯させた。

- T どんなことに気がついたかな。
 C₁ まめ球をつけないときはモーターの音が大きく、まめ球をつけたら音が小さくなった。
 T どうして音が変わったのかな。
 C₂ モーターの速さが始めは速く、まめ球をつけたら遅くなった。
 T その理由を考えてみよう。

- C₃ モーターの回転のエネルギーがまめ球の熱や光のエネルギーに移った。
 T そう飛躍しないで、レンツの法則との関係は
 C₄ 誘導電流が流れると、磁界の変化ということは回転を、妨げるから、それに勝つような力で回すから、エネルギーがよけいいる。

最後に総まとめとして、エネルギー概念の本質である状態の変化と関連させながら、エネルギー変換の流れを考察させた。かなり誘導した結果、次の流れを作成させた。(エネルギーをEとかいた。)

装 置	モ ー タ ー 1	ジョイント	モーター2（発電機）
状 態 の 変 化	電流が流れる→ 電機子が回転する；回転が伝わる，コイル（電機子）が回転する		
エネルギー変換	（電 気 E）→（ 力 学 的 E ）		
モーター2（発 電 機）		まめ 球	
→ コイルの中の磁界が変化する → 回路に誘導電流が流れる → まめ球の温度が上がる → 光る			
→（ ）→（ 電 気 E ）→（ 熱 E ）→（光のE）			

6 評 価

この単元は大きく3つに分けられる。すなわち、① 磁石による磁界と電流による磁界の相互作用、② 電磁誘導、③ エネルギー的な見方である。

①は、今まで学習してきた磁界の引力、斥力による見方では説明のつかない力が導入されている。従って、この力をどの程度理解できたか。

②は、目に見えない電磁誘導現象のからくりを調べて、誘導電流の流れる理由、その大きさと向きについての規則をどの程度理解できたか。

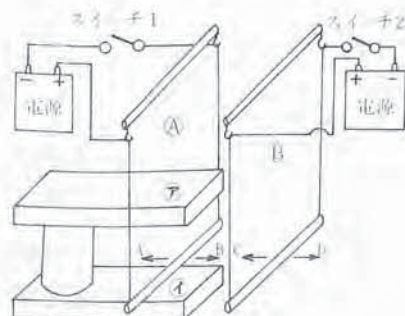
③は、①、②の現象を、状態の変化と、それに伴うエネルギー変換の見方で統一的には握できるかどうか。
 である。

以上の観点から次のテストやリポートで、生徒の定着度を検討する資料を得た。

[テスト]

- (1) 右図のように、同じ電気ブランコを2つ作って、実験した。この実験について次の①～④の問いに答えよ。

- ① スイッチ1を入れたら、ブランコ②はAの向きに動いた。U字形磁石のN極は⑦、⑧のどちらか。
- ② スイッチ1を切ってスイッチ2を入れると、ブランコ⑥は、C、Dのどちらの向きに動くか。
- ③ スイッチ2を切ってスイッチ1を入れ、電流の値が大きくなるように電圧を高くしたら、ブランコの振れの大きさはどうなるか。
- ④ スイッチ1を切ってスイッチ2を入れ、③と同じ電流の値にすると、ブランコ⑥の振れの大きさは、ブランコ②の振れの大きさに比べてどうなるか。またその理由を述べよ。



(2) 右図は発電機の原理を示している。この図をみて次の①～③の間に答えよ。

- ① 永久磁石のS極がb点付近にあるとき、電流はどの向きに流れるか。電流計の横に矢印で示せ。
- ② 永久磁石のS極がa点付近にあるときと、b点付近にあるときとは、どちらが強い電流が流れるか。
- ③ 磁石の回転を速くすると、電流計の針のふれはどうか。

〔リポート〕

右図に示すような変圧器（ファラデーの電磁誘導の実験装置）の1次コイルに電源装置をつなぎ、2次コイルにまめ球をつないで、交流電流と直流電流をそれぞれ流して反応を調べる実験を演示し、次の結果を得た。

- 交流電流を流したとき → まめ球がついた。
- 直流電流を流したとき → まめ球はつかなかったが、1次コイルが熱くなった。

この現象が生じるわけと、エネルギーの変換した順序をリポートさせた。

〔調査結果〕

(1), (2)の正答率、及びリポートの例を次に示して、考察を加える。

問題番号	正答率
(1) ①	84
②	77
③	93
④	74, 67
(2) ①	85
②	87
③	91

- (1) ①, ②から電流が磁界から受ける力の向きについてはよく理解されていると考えられる。しかし、②が①より若干低いのは、①によって磁極を決定した後に②を考えなければならなかったためであろう。
- ③で電流の大きさと受ける力の大きさの関係は、はっきりと理解されていた。
- ④では磁界の強さと受ける力の強さの関係が、ほぼ理解されたとみたい。
- (2) ①ではレンツの法則の適用がよく理解されていると思われる。
- ②では電磁誘導の原因となる磁界の変化の大きさを比較させたが、よく理解して比較していた。
- ③は誘導電圧が磁界の変化の速度に関係していることを問うたが、よく理解していた。

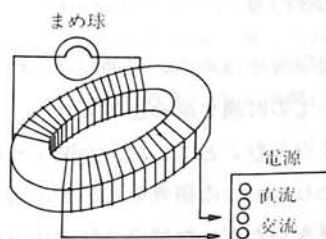
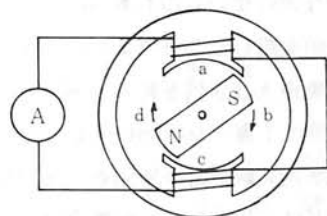
リポート例と考察

1例 1次コイルでは交流電流が流れているためにN極とS極がたえず入れ替わっている。そのために、2次コイルから誘導電流が流れて電球がつく。しかし直流では電流が流れた瞬間と電流が切れる瞬間にわずかに2次コイルに電流が流れるだけであるから電球はつかない。

エネルギーでまとめると

- 交流：電気エネルギー → (鉄心がN, Sに入れ換わる) → 電気エネルギー → 光のエネルギー
- 直流：電気エネルギー → 熱エネルギー

考察 電磁誘導現象はかなりよく理解していた。しかし、ドーナツ状の鉄しんにN, Sを仮想した生徒が多かった。というのは、これまでに生徒の使った磁石は開いた磁気回路であったためで、無理からぬことである。また、磁気エネルギーは教えてないのでとばしたリポートが多かった。



7. 総 括

① 生徒の自然認識の順序性を尊重して教材を配列し、指導過程としたことによって、例えば、磁界中を流れる電流が磁界と相互作用をする現象から、その規則性を発見する学習過程に見られるように、探究が円滑に進み、内容の理解が得やすくなった。また、学習を進めていくに従い、生徒からいろいろな問題がでてきた。それらは簡単に解決できるものもあれば、程度が高すぎて、現象のは握のみにとどめ

るしか仕方のないものもあった。ともあれ、このことは生徒が内容をよく理解して、その発展として新しい疑問を抱いたことで、この実践の成果としたい。

② 現象優先の立場を貫き、明確な現象の提示につとめたことは、生徒に自分たちの手で実験して現象を観察する喜びを味わわせるとともに、意欲的に問題意識をもって探究に着手させることができた。特に演示用実験装置の開発や、強力なアルニコ磁石、電源装置、検流計などをグループ実験数そろえたことなどは、この教材の指導過程に非常な好結果をもたらした。

8 おわりに

この研究を進めていく過程で、われわれは、生徒の学習能力の面からいく度となく教材構成の再検討についての討議を積み重ねてきた。その結果、一つの探究の過程に対して、いくつかの対策を用意して指導にのぞむことにした。今後、それらを整理して、中学校理科の内容を検討する資料にしたいと思う。

終わりに、この研究を進めるに当たり、いろいろと御高配くださった所属校校長先生をはじめ、協力と助言をいただいた関係の諸先生方に敬意と謝意を表したい。

文 献

- 1) 滝沢武久：「学習方法」の学習について、講演記録(1975)
- 2) 小山久栄ほか：新潟県立教育センター実践研究集録第11集理科(中学校・高等学校)編(1973)
- 3) 駒野庄平ほか：新潟県立教育センター実践研究集録第8集理科(中学校・高等学校)編(1970)
- 4) 茅誠司ほか監訳：PSSNS教養の物理科学、東京化学同人(1972)
- 5) 文部省：中学校指導書、大日本図書(1970)
- 6) 東京書籍：新しい科学教師用指導書第1分野下、東京書籍(1973)